

Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>

Determination of some characteristic fracture of concrete of notched beam in bending test



Bui Truong Son ^{1,*}, Pham Duc Tho ², Nguyen Thi Nu ¹, Tran The Truyen ³, Tran Nam Hung ⁴

¹ Faculty of Geoscience and Geoengineering, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

² Faculty of Civil Engineering, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

³ Faculty of Civil Engineering, University of Transport and Communications, Vietnam

⁴ Le Quy Don Technical University, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17th Oct. 2020

Revised 19th Nov. 2020

Accepted 31st Dec. 2020

Keywords:

Concrete,
Characteristic fracture,
Fracture mechanic,
Lattice model,
Notched beam in bending test,

ABSTRACT

This paper presents the identification some principal fracture parameters of concretes by experiment and simulation on notched beam in bending. The comparison between experimental and simulation results allows to determinate the Critical stress intensity factors K_{IC} , fracture energy G_f and characteristic lengths of fracture process zone (FPZ) l_{ch} of 6 class of concrete with the compression resistance varying from 20 MPa to 50 MPa. These are important parameter in the model for predicting the timelife of concrete structure exposed in coastal area.

Copyright © 2020 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

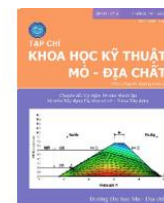
E - mail: buitruongson@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.HTCS2020.13



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Xác định một số đặc tính phá hủy của dầm bê tông nứt mỗi khi chịu uốn

Bùi Trường Sơn ^{1,*}, Phạm Đức Thọ ², Nguyễn Thị Nụ ¹, Trần Thế Truyền ³, Trần Nam Hưng ⁴

¹ Khoa Khoa học và Kỹ thuật Địa chất, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

² Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

³ Khoa Công trình, Trường Đại học Giao thông vận tải, Việt Nam

⁴ Trường Đại học kỹ thuật Lê Quý Đôn, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

TÓM TẮT

Quá trình:

Nhận bài 17/10/2020

Sửa xong 19/11/2020

Chấp nhận đăng 31/12/2020

Từ khóa:

Bê tông,

Cơ học phá hủy,

Dầm nứt mỗi chịu uốn,

Đặc tính phá hủy,

Mô hình lưới,

Bài báo giới thiệu kết quả xác định một số đặc tính phá hủy của bê tông bằng thí nghiệm và mô phỏng. Thông qua việc so sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho phép xác định được một số đặc tính phá hủy như năng lượng phá hủy G_f , chiều dài đặc trưng của vùng phá hủy l_{ch} và cường độ ứng suất giới hạn K_{Ic} của 6 loại bê tông có cường độ chịu nén từ 20 MPa đến 50 MPa. Đây là những đặc tính quan trọng trong nghiên cứu nâng cao tính chính xác, độ tin cậy tính toán và tuổi thọ của công trình bê tông cốt thép.

© 2020 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Quá trình phá hủy của vật liệu gần như giòn như bê tông, đá được đặc trưng bởi vùng giảm yếu xung quanh điểm đầu của vết nứt (tip of the macro-crack). Ngay sau khi hình thành vết nứt, quá trình lan truyền và mở rộng sẽ diễn ra trong vùng phá hủy (fracture process zone - FPZ) (Chaboche, 1993). Việc xác định một số đặc tính phá hủy cơ bản như năng lượng phá hủy, cường độ ứng suất giới hạn và độ bền nứt giới hạn của vật liệu cho phép phân tích hình thành vết nứt, độ

mở rộng và quá trình lan truyền trong các kết cấu, phục vụ cho công tác đánh giá, dự báo tính ổn định và bền vững của các công trình xây dựng bằng bê tông. Nứt xuất hiện trong bê tông sẽ dẫn đến giảm khả năng mang tải, tăng độ thấm... Trong trường hợp kết cấu bê tông làm việc trong môi trường có tính xâm thực như môi trường biển, bê tông có độ thấm lớn có thể dẫn đến tăng tốc độ xâm nhập của các tác nhân gây ăn mòn kết cấu và tăng tốc độ gỉ của cốt thép. Đã có nhiều nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra mối quan hệ giữa độ mở rộng vết nứt và độ thấm nước của bê tông (Desmettre and Charron, 2011; Gilles Pijaudier-Cabot và nnk., 2009; Liu và nnk., 2016).

Sự hình thành và phát triển nứt của bê tông có liên quan chặt chẽ đến tính không đồng nhất

* Tác giả liên hệ

E - mail: buitruongson@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.HTCS2020.13

của vật liệu này. Độ mở rộng vết nứt của vật liệu này là kết quả của quá trình phá hủy phức tạp ở cấp độ vật liệu (meso-scale) (Peter Grassl, 2009). Tuy nhiên, việc mô phỏng số sự phát triển của vết nứt theo phương pháp phần tử hữu hạn truyền thống gặp nhiều khó khăn khi xuất hiện vết nứt không ổn định. Kết quả phụ thuộc vào kích thước phần tử và tính cục bộ của vết nứt có thể dẫn đến tính không hội tụ của thuật toán (ứng suất ở đáy vết nứt tiến đến vô cùng).

Năng lượng phá hủy G_f , theo RILEM (Bazant and Xiang, 1997; Karihaloo, 1995) được xác định như sau:

$$G_f(\alpha, W) = \frac{1}{(W-a)B} \int Pd\delta \quad (1)$$

Trong đó: δ - độ võng của dầm.

Cường độ ứng suất K_{IC} , được xác định từ năng lượng phá hủy:

$$K_{IC} = \sqrt{G_f(\alpha, W)E} \quad (2)$$

Chiều dài đặc trưng vết nứt (Jan G.M. van Mier, 2013; Karihaloo, 1995):

$$L_{ch} = \frac{G_f(\alpha, W)E}{f_c^2} \quad (3)$$

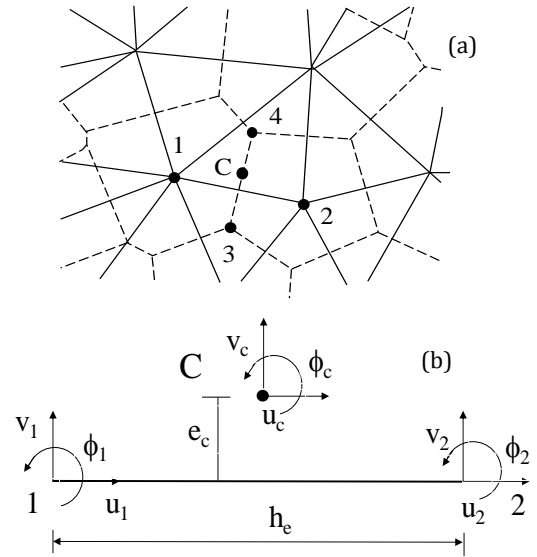
2. Mô hình ứng xử cơ học phá hủy

Trong mô hình này, các phần tử cơ học được rời rạc hóa thành các phần tử dạng dầm (truyền lực pháp tuyến, lực cắt và mô men uốn) hoặc dạng thanh (chỉ truyền lực pháp tuyến) được đặt trên các cạnh tam giác Delaunay có chiều dài h_e (Hình 1a). Mỗi điểm có 3 bậc tự do, gồm có hai chuyển vị u và v , và góc xoay ϕ (Hình 1b). Những chuyển vị và góc quay này cho phép xác định bước nhảy tại trung điểm C của phần tử mặt cắt ngang trung tuyến. Biến dạng tại trung điểm C của mặt cắt ngang được xác định như sau:

$$\varepsilon_c = \frac{\bar{u}_c}{h_e} = \frac{1}{h_e} B\bar{u}_e \quad (4)$$

Trong đó: h_e - chiều dài của phần tử, e_c - độ lệch tâm.

$$B = \begin{bmatrix} -1 & 0 & e_c & 1 & 0 & -e_c \\ 0 & -1 & -h_e/2 & 0 & 1 & -h_e/2 \end{bmatrix}$$



Hình 1. a) Đa giác Voronoi và tam giác Delaunay; b) Phần tử cơ học.

Ma trận độ cứng của phần tử lưới được xác định bởi:

$$K = \frac{A}{h_e} B^T D_e B \quad (5)$$

$$D_e = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & \gamma E & 0 \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix}$$

Trong đó: D_e - ma trận độ cứng đàn hồi, A - diện tích mặt cắt ngang, l_e - là chiều dài cạnh của đa giác Voronoi (Hình 1b), E và γ - các thông số của mô hình, kiểm soát mô đun Young và hệ số Poisson của vật liệu.

$$\nu = \frac{1-\gamma}{3+\gamma} \quad (6)$$

Trong trường hợp mô hình phá hủy đẳng hướng, mối quan hệ giữa biến dạng và ứng suất được xác định bởi (Grassl, 2009). Sự phát triển của phá hủy được kiểm soát bởi đường biểu diễn ứng suất - độ mở rộng vết nứt, chính vì vậy mà ứng xử cơ học không phụ thuộc vào chiều dài của phần tử lưới lattice. Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng được biểu diễn như sau:

$$\sigma = (1 - \omega)D_e\varepsilon = (1 - \omega)\bar{\sigma} \quad (7)$$

Trong đó: ω là hệ số phá hủy; $\bar{\sigma} = (\bar{\sigma}_n, \bar{\sigma}_s, \bar{\sigma}_\phi)^T$ và ma trận độ cứng đàn hồi D_e . Biến phá hủy của vật liệu ω là hàm số của biến lịch sử κ , được xác định bởi hàm tải trọng:

$$f(\varepsilon, \kappa) = \varepsilon_{eq}(\varepsilon) - \kappa \quad (8)$$

Biến dạng tương đương ε_{eq} được xác định:

$$\varepsilon_{eq}(\varepsilon_s, \varepsilon_n) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (1 - c) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 (c - 1) + \varepsilon_n\right)^2 + \frac{c \lambda^2 \varepsilon_s^2}{q^2}} \quad (9)$$

Trong đó: ε_0 , c và q - những thông số của mô hình, những thông số này liên quan trực tiếp đến cường độ và độ cứng của các phần tử lưới. Theo (Grassl and Jirásek, 2010) biến dạng tương đương chỉ phụ thuộc vào hai thành phần biến dạng pháp tuyến và biến dạng trượt $(\varepsilon_n, \varepsilon_s)$.

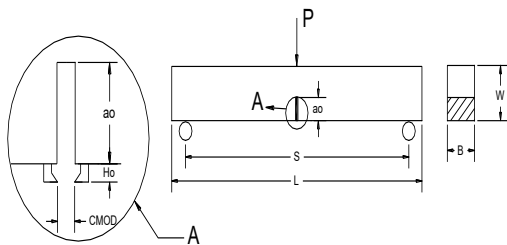
3. Thực nghiệm dầm chịu uốn 3 điểm

Mẫu bê tông thí nghiệm được thiết kế theo TCVN 10306:2014, cường độ chịu nén của mẫu hình trụ 15x30 cm từ 20 đến 50 MPa (20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa và 50 MPa). Dầm có kích thước $L = 660$ mm, $S = 600$ mm, $W = 200$ mm, $B = 50$ mm, $a_0 = 40$ mm.

Bê tông sau khi chế tạo được bảo dưỡng trong 28 ngày trong điều kiện nhiệt độ và độ ẩm tiêu chuẩn.

Thí nghiệm về lan truyền nứt được thực hiện trên máy uốn mẫu dầm của phòng thí nghiệm LAS-XD125, Trường Đại học Xây dựng. Sơ đồ bố trí thí nghiệm được thể hiện trong Hình 2. Cấp gia tải được chọn phụ thuộc vào kích thước dầm. Từ mối quan hệ tải trọng - độ võng xác định được một số đặc tính phá hủy của bê tông.

Quy trình thí nghiệm: Thí nghiệm được tiến hành trên máy trong điều kiện khống chế biến dạng để đảm bảo lan truyền nứt là ổn định, thời gian gia tải 5 phút.

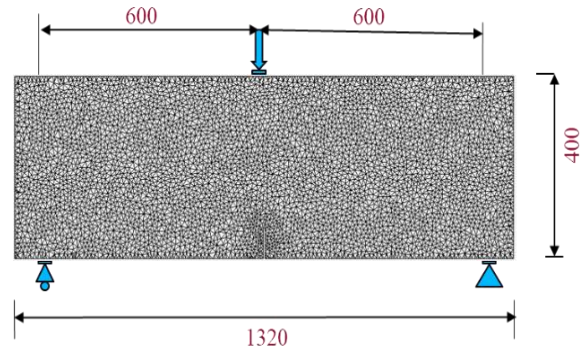


Hình 3. Bố trí thí nghiệm uốn ba điểm dầm có nứt mới.

4. Mô phỏng dầm chịu uốn 3 điểm

Trong bài toán này, nhóm tác giả mô phỏng dầm có một vết nứt mới ở giữa dầm chịu uốn. Miền nghiên cứu được rời rạc thành các đa giác Voronoi và tam giác Delaunay, trong đó các phần tử cơ học được đặt trên các cạnh của tam giác Delaunay.

Chia lưới phần tử và các điều kiện biên áp dụng cho mô phỏng số thí nghiệm uốn dầm 4 điểm này được mô tả trong Hình 3. Kích thước dầm và chiều cao vết nứt mới tại giữa dầm có kích thước tương tự như mẫu thí nghiệm. Dầm được đặt trên 2 gối và chịu 1 lực tập trung giữa dầm. Với kích thước dầm như thế, khi chịu tải trọng chỉ xuất hiện 1 vết nứt mới duy nhất, cho phép xác định dễ dàng một số đặc tính phá hủy của vật liệu.



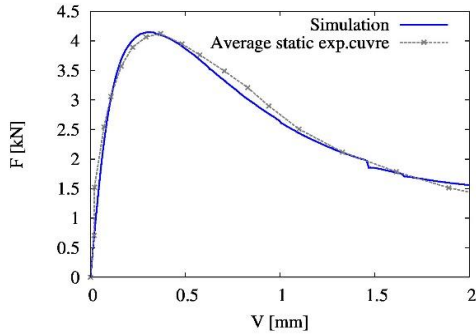
Hình 2. Chia lưới và điều kiện biên.

Các thông số của mô hình bao gồm: Mô đun đàn hồi, cường độ chịu kéo, cường độ chịu nén, năng lượng phá hủy phụ thuộc vào mác của bê tông.

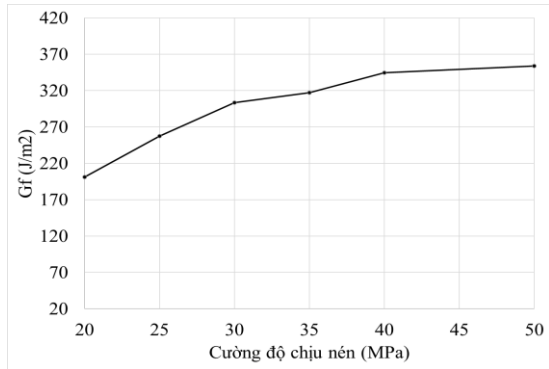
5. Kết quả và thảo luận

Độ võng được xác định tại vị trí giữa dầm trong quá trình gia tải. Mối quan hệ giữa độ võng và tải trọng được thiết lập để so sánh với kết quả thực nghiệm (Hình 4). Kết quả mô phỏng tốt ứng xử ngoài giới hạn đàn hồi của bê tông, ngay cả khi trong bê tông xuất hiện nứt cục bộ.

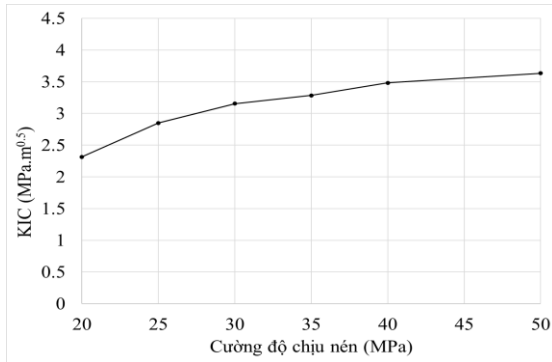
Các thông số về năng lượng phá hủy, cường độ ứng suất và chiều dài đặc trưng của vùng phá hủy được xác định trong Hình 5, Hình 6 và Hình 7. Năng lượng phá hủy tăng theo cấp bê tông, $G_f = 210$ J/m² đối với bê tông Rc = 20 MPa và $G_f = 353$ J/m² đối với bê tông Rc = 50 MPa, gấp 1.68 lần. Kết quả xác định cường độ ứng suất cũng cho thấy cùng tỷ lệ tăng khi cường độ của bê tông tăng. Tuy nhiên chiều dài đặc trưng của vùng phá hủy của



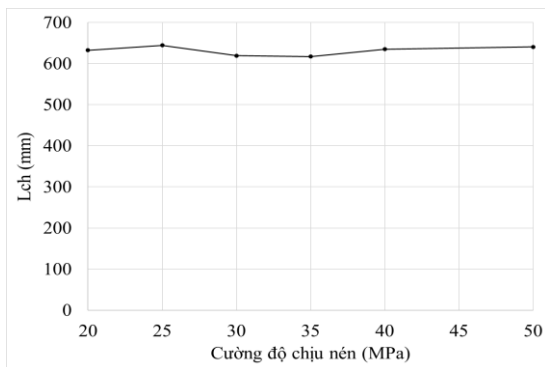
Hình 4. Quan hệ lực - độ võng.



Hình 6. Năng lượng phá hủy (Gf) và cường độ chịu nén.



Hình 6. Quan hệ giữa cường độ ứng suất (KIC) và cường độ chịu nén.

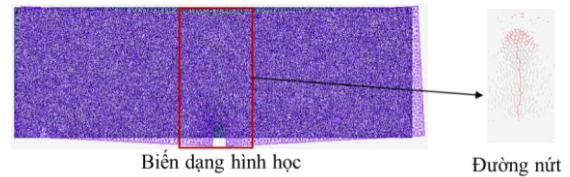


Hình 6. Chiều dài đặc trưng phá hủy.

bê tông gần như không thay đổi, dao động từ 617 đến 640 mm. Với thí nghiệm nứt môi, vết nứt chỉ xuất hiện tại vị trí giảm yếu, thí nghiệm như thế cho phép dễ dàng kiểm soát mối quan hệ giữa tải trọng - độ võng hay tải trọng - độ mở rộng vết nứt. Mô hình số cũng cho kết quả nứt và biến dạng (Hình 9) tương tự như kết quả thí nghiệm (Hình 8).



Hình 8. Phá hủy dầm nứt môi chịu uốn.



Hình 8. Mô phỏng phá hủy dầm nứt môi chịu uốn.

6. Kết luận

Bài báo giới thiệu một phương pháp xác định một số đặc trưng phá hủy của bê tông thông qua việc so sánh kết quả lực - độ võng của thực nghiệm và mô phỏng số. Kết quả nghiên cứu cung cấp một bộ số liệu về một số đặc trưng phá hủy của bê tông, là tài liệu tham khảo quan trọng trong công tác thiết kế, đánh giá độ bền của bê tông khi làm việc ngoài trạng thái đàn hồi (đã xuất hiện làn truyền nứt hoặc nứt cục bộ) và làm cơ sở cho việc đánh giá độ bền và tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép.

Lời cảm ơn

Bài báo nhận được sự tài trợ từ đề tài cấp Bộ, Bộ Giáo dục và Đào tạo, mã số B2020-MDA-12.

Đóng góp của các tác giả

- Lên ý tưởng: Bùi Trường Sơn, Phạm Đức Thọ; Thu thập dữ liệu: Nguyễn Thị Nụ, Trần Thế Truyền, Trần Nam Hưng; Thực hiện các thí

nghiệm: Bùi Trường Sơn, Trần Thế Truyền; Chạy mô hình: Bùi Trường Sơn, Phạm Đức Thọ, Trần Nam Hưng; Viết bản thảo gốc: Bùi Trường Sơn, Phạm Đức Thọ, Nguyễn Thị Nụ, Trần Thế Truyền, Trần Nam Hưng; Chính sửa bản thảo: Bùi Trường Sơn, Phạm Đức Thọ, Nguyễn Thị Nụ.

Tài liệu tham khảo

- Bažant, Z.P., Xiang, Y., (1997). Crack Growth and Lifetime of Concrete under Long Time Loading. *J. Eng. Mech.* 123, 350-358. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:4\(350\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:4(350)).
- Chaboche, J.L, (1993). Development of continuum damage mechanics for elastic solids sustaining anisotropic and unilateral damage 311-329.
- Desmettre, C., Charron, J.-P., (2011). Novel water permeability device for reinforced concrete under load. *Mater. Struct.* 44, 1713-1723. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9729-6>
- Gilles Pijaudier-Cabot, Frédéric Dufour, Marta Choinska, (2009). Permeability due to the Increase of Damage in Concrete: From Diffuse to Localized Damage Distributions. *J. Eng. Mech.* 135, 1022-1028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000016)
- Grassl, P., Jirásek, M., (2010). Meso-scale approach to modelling the fracture process zone of concrete subjected to uniaxial tension. *Int. J. Solids Struct.* 47, 957-968. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.12.010>
- Jan G.M. van Mier, (2013). Concrete Fracture: A Multiscale Approach.
- Karihaloo, B.L., (1995). Fracture Mechanics and Structural Concrete. *Longman Scientific & Technical*.
- Liu, H., Zhang, Q., Gu, C., Su, H., Li, V.C., (2016). Influence of micro-cracking on the permeability of engineered cementitious composites. *Cem. Concr. Compos.* 72, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.016>
- Peter Grassl, (2009). A lattice approach to model flow in cracked concrete. *Cem. Concr. Compos.* 31, 454-460.